대용량 저산소 농도 살충 챔버 시스템을 이용한 박물관 해충의 살충력 및 운용성 평가

오준석¹ | 최정은
국립민속박물관 보존과학실

The Evaluation of Disinfection and Operation of Large Scale Anoxic Chamber System for Museum Insects

Joon Suk Oh¹ | Jung Eun Choi

Conservation Laboratory, The National Folk Museum of Korea, Seoul, 110-820, Korea

¹Corresponding Author: kcommune@yahoo.co.kr, +82-2-3704-3276

초록 질소와 아르곤을 사용한 대용량 저산소 농도 살충 챔버 시스템(내용적 28m³)을 이용하여 박물관에서 발견되는 문화재 해충에 대한 살충력 및 운용성을 평가하였다. 질소 환경에서 저산소 농도 살충처리를 하였을 때 산소 농도 0.01%, 습도 50%의 환경하에서 나무 블록 속의 권연벌레 성충, 애벌레, 알의 완전 살충에는 20℃ 15일, 25℃ 10일, 30℃ 7일이 소요되었다. 아르곤 환경에서는 20℃ 10일, 25℃ 7일, 30℃ 5일이 소요되어, 질소 저산소 농도 살충처리는 아르곤에 비해 살충시간이 50% 더 소요되었다. 살충 시험 결과로부터 최적 살충 조건은 산소 농도 0.01%, 온도 25℃, 습도 50%, 살충시간 21일로, 질소발생기로 대량의 질소를 자동 공급이 가능한 질소 저산소 농도 살충법은 대용량 저산소 농도 살충 챔버 시스템의 안정적인 운용이 가능한 방법으로 평가되었다. 최적 살충 조건에서 나무 블록, 면직물, 견직물, 한지 서적에 넣은 권연벌레의 알, 애벌레, 번데기, 성충, 인삼벌레의 성충, 애벌레, 알락수시령이 애벌레 및 사육함의 암검은수시령이의 애벌레, 성충 그리고 쌀바구미 성충은 100% 살충이 되었다. 본 연구를 통해 대용량 저산소 농도 살충 챔버 시스템은 질소 저산소 농도 살충법으로 박물관 발생 문화재 해충의 완전 살충과 원활한 운용이 가능할 것으로 판단되었다.

중심어: 산소 농도 살충처리, 대용량 저산소 농도 살충 챔버 시스템, 산소 농도, 온도, 습도, 아르곤, 질소, 살충률, 최적 살충 조건, 권연벌레, 인삼벌레, 애알락수시령이, 암검은수시령이, 쌀바구미

ABSTRACT Large scale anoxic chamber system(volume 28m³) was developed and installed at The National Folk Museum of Korea for the first time in Korea. In order to get optimal anoxic treatment condition, we compared the disinfection of adults, larvae and eggs of cigarette beetles using nitrogen and argon. The time for complete disinfection of cigarette beetles in pine wooden blocks exposed to nitrogen at oxygen concentration 0.01% and 50% in relative humidity were 15 days at 20℃, 10 days at 25℃, and 7 days 30℃. Time were 10 days at 20℃, 7 days at 25℃, and 5 days 30℃ in argon anoxic atmosphere. From the mortality of cigarette beetles, optimal disinfection condition was oxygen concentration 0.01%, 25℃ in temperature, 50% in relative humidity and exposure time 21 days at nitrogen atmosphere. And when large scale anoxic chamber system was supplied nitrogen by nitrogen generator for anoxic treatment of many collections or large collections, it could be operated stably. To verify optimal disinfection condition, museum insects(adults, larvae, pupae and eggs of cigarette beetles in pine wooden blocks, cotton fabrics and Korean paper book, adults and larvae of

drugstore beetles in pine wooden blocks, cotton fabrics and Korean paper book, larvae of varied carpet beetles in pine wooden block and silk fabrics, adults and larvae of hide beetles and adults of rice weevils in breeding boxes) which exposed at optimal disinfection condition, were completely killed.

Key Words: Anoxic treatment, Anoxic chamber system, Oxygen concentration, Temperature, Relative humidity, Argon, Nitrogen, Mortality, Optimal disinfection condition, Cigarette beetle, Drugstore beetle, Varied carpet beetle, Hide beetle, Rice weevil

1. 서 론

유유해생물로부터 문화재의 보존을 목적으로 해충의 살충을 위해 19세기부터 20세기에 이르기까지 비소나 염화수은과 같은 독극물뿐만 아니라 DDT(Dichloro-Diphenyl-Trichloroethane), 나프탈렌, 파라디클로로벤젠과 같은 살충제, 메틸브로마이드나 설푸릴플루오라이드와 같은 훈증 가스가 사용되어 왔다(Goldberg, 1996). 그러나 이와 같은 물질들은 인체에 치명적일 뿐만 아니라 독극물에 의한 문화재의 오염에 따른 박물관 직원의 건강에도 나쁜 영향을 미치는 등 여러 가지 문제를 야기하였다. 특히 훈증 약제인 메틸브로마이드가 오존층 파괴물질로써 1997년 몬트리올 의정서에서 최종 전폐 일정이 결정되어(United Nations Environment Programme, 1997) 선진국은 2005년, 우리나라를 포함한 개발도상국은 2015년 전폐가 결정되었다. 선진국에서는 독성이 강한 화학 살충제의 사용을 줄이고 환경 친화적인 방법의 도입을 위해, 미연에 생물피해를 줄이기 위한 예방법으로써 종합유해생물관리(IPM, Integrated Pest Management)라는 새로운 개념의 도입과 함께 1980년대부터 화학약제를 사용하지 않는 새로운 생물방제법에 대한 연구를 통해 현재 다양한 방제법(저산소법, 이산화탄소법, 고온법, 저온법)이 운용되고 있다(Oh, 2004).

메틸브로마이드 대체 문화재 해충의 살충법 중 널리 활용되고 있는 저산소 농도 살충법은, 1989년 미국 게티연구소와 오스트레일리아박물관에서 질소를 이용하여 인위적으로 산소 농도가 제어된 공기(controlled atmosphere)로 만든 저산소 환경 하에서 살충 연구가 처음 시작되었다. 현재는 질소, 아르곤, 탈산소제 등을 이용한 저산소 농도 살충법이 문화재 해충의 살충에 보편적인 방법 중의 하나로 자리를 잡게 되었다(Selwitz *et al.*, 1998). 질소 환경하에서의 저산소 농도 살충법(질소 저산소 농도 살충법)은 게티박물관(J. Paul Getty Museum), 국립독일박물관(Deutsches Museum), 국립호주박물관(National Museum of Australia),

로열온타리오박물관(Royal Ontario Museum), 홍콩 文物修復辯士處, 일본 규슈국립박물관, 싱가포르국립문서보관소(National Archives of Singapore) 등, 아르곤 환경하에서의 저산소 농도 살충법(아르곤 저산소 농도 살충법)은 미국 메트로폴리탄박물관(The Metropolitan Museum of Art), 브라질 상파울루미술관(Museo d'Arte in São Paulo), 싱가포르미술관(Singapore Art Museum) 등 전세계 선진국이나 개발도상국 박물관, 미술관 등에서 널리 운용되고 있다.

국내에서는 1990년대 말부터 IPM이 소개되기 시작하여 현재 여러 박물관에서 도입되어 운용하고 있다. 그러나 약제를 사용하지 않는 친환경적인 생물방제법은 2000년대 말부터 연구가 시작되었지만 아직 살충 기술 확보를 위한 연구 중이다(Kang, 2009a, Kang, 2009b, Oh, 2011, Jeong *et al.*, 2011, Chung *et al.*, 2012, Lee *et al.*, 2012, Oh *et al.*, 2012). 국내에서 저산소 농도 살충처리를 위한 장비는 2011년 최초로 시험용 살충 챔버 시스템(내용적 0.5m³)이 개발되어 국립민속박물관에 도입되었고(Oh *et al.*, 2012), 2012년에는 국립민속박물관 소장품의 살충처리를 위한 대용량 저산소 농도 살충 챔버 시스템(내용적 28m³), 2013년에는 이동이 가능한 저산소 농도 살충처리용 텐트(내용적 30m³)가 도입되었다.

저산소 농도 살충법은 문화재의 재질에 거의 영향을 미치지 않는 불활성 가스(아르곤, 질소)를 사용하며 산소 농도, 온도, 습도, 가스 종류, 해충의 종류, 해충의 성장 단계에 따라 살충의 효율이 다르다(Rust *et al.*, 1993, Valentin, 1993, Selwitz *et al.*, 1998, Oh, 2011). 그러나 저산소 농도 살충법의 경우, 극한의 저산소 농도($\sim 0.01\%$)에 도달, 유지를 위해서는 고도의 기밀성을 가진 장치가 필요한 단점이 있다. 이에 비해 이산화탄소 살충법의 살충조건은 높은 산소 농도(8~10%) 및 이산화탄소 농도(60~80%)가 요구되어 텐트에서도 운용이 가능한 편리성이 있지만(Kigawa *et al.*, 2001, Hidaka *et al.*, 2002, Nochide *et al.*, 2004), 국

내의 박물관에서도 가끔씩 발생하는 범하늘소(*Chlorophorus diadema* (Motschulsky))(The National Folk Museum of Korea, 2008)와 같이 살충처리에 내성이 강한 하늘소류는 이산화탄소 살충에 내성이 매우 강한 것으로 알려져 있다 (Valentin, 1993, Nochide, 2004).

본 연구는 한국의 박물관에서 발생하는 문화재 해충의 살충을 목적으로, 대용량 저산소 농도 살충 챔버 시스템을 활용하여 문화재 해충에 대한 질소와 아르곤 저산소 농도 살충처리에 따른 살충력 비교 및 저산소 농도 살충 챔버 시스템의 운용성의 평가를 위해 최적 살충 운전 조건을 선정 하고, 선정된 최적 살충 조건에서 여러 종의 문화재 해충에 대한 살충력을 검증하여, 대용량 저산소 농도 살충시스템의 운용방안을 제시하고자 한다.

2. 실험 조건

2.1. 대용량 저산소 농도 살충 챔버 시스템

실험에 사용된 대용량 저산소 농도 살충 챔버 시스템은 외부 W3,800× D3,700× H2,960mm, 내부 W3,400× D3,700× H2,200mm이며 내부 용적은 28m³이다. 전 공정이 자동제어로 운용되는 시스템으로, 산소 농도는 0.01% 까지 저산소 농도 유지가 가능하며, 온도 10~50℃, 습도 30~80% 범위에서 항온항습을 유지할 수 있다. 그리고 산소를 일정하게 저농도로 유지하기 위해 챔버 내 산소 농도가 설정치 이상 높아질 때마다 가스가 공급(semi-dynamic mode)(Valentin, 2002)되는 시스템이다. 가스는 액화 아르

Figure 1. Anoxic chamber system.

곤 실린더(중압 용기 기준 최대 공급량 100 L/분), 액화 질소 실린더(중압 용기 기준 최대 공급량 100 L/분) 및 질소 발생기(질소 순도 99.99%, 최대 공급량 300 L/분)를 통해 공급을 선택할 수 있으며, 액화 아르곤이나 액화 질소는 기화기를 거쳐 기체상태로 챔버 내부에 공급되는 시스템이다(Figure 1).

2.2. 최적 살충 조건 선정 시험

2.2.1. 시험 대상 해충

가스, 살충 온도 및 살충 시간에 따른 최적 살충률 선정을 위한 실험 대상 해충은 권연벌레(*Lasioderma serricorne* (Fabricius)) 알, 애벌레 및 성충을 선정하였다(Table 1). 권연벌레는 종이, 건조동식물질을 가해하는 해충으로 국내의 박물관에서 발생 빈도가 높은 대표적인 문화재 가해 해충이다. 그리고 권연벌레는 국내의 박물관에서 주로 발견되는 동식물질 가해 문화재 해충 중 범하늘소를 제외하고는 선행 연구에서 살충에 가장 많은 시간이 소요되는 종이다(Rust *et al.*, 1993, Valentin 1993). 국내 민속자료에서 가끔 발생하는 범하늘소(The National Folk Museum of Korea, 2008)는 국내에서 사육하지 않으며, 실험에 사용할 정도의 개체수를 야생에서도 확보할 수 없기 때문에 살충 시험 대상으로 선정할 수 없었다. 그러나 선행 연구에 따르면(Valentin, 1993) 질소나 아르곤 저산소 농도 살충법에서 범하늘소와 유사한 하늘소인 old house borer(*Hylotrupes bajulus* Linnaeus)가 권연벌레에 비해 2배의 살충시간이 소요되기 때문에, 권연벌레의 살충시간으로부터 범하늘소의 살충시간을 유추할 수 있다. 그리고 권연벌레 성충과 함께 알과 애벌레를 평가 대상으로 선정한 것은, 곤충의 성장 단계에 따라 살충에 대한 내성이 다르며 성충 보다 알, 애벌레, 번데기가 내성이 강하기 때문이다.

2.2.2. 살충 조건

저산소 살충법은 살충 조건(산소 농도, 온도, 습도, 가스)에 따라 살충 효율에 큰 영향을 미친다(Rust *et al.*, 1993, Valentin, 1993, Oh, 2011). 선행 연구에서 박물관 해충의 저산소 살충처리에 사용된 질소와 아르곤 가스를 사용하여 완전한 살충에 충분한 산소농도(0.1% 이하)와 박물관에서의 자료 보관 온습도를 기초로 살충 시험 조건을 설정하였다. 산소 농도 0.01%, 온도 20℃, 25℃, 30℃, 습도 50% 조건에서, 해충들을 1일, 3일, 5일, 7일, 10일, 13일, 15일, 20일, 30일간 노출시켜, 질소와 아르곤 가스 저산소

Table 1. Experimental details of museum insects.

Museum Insect	Damage material	Optimal disinfection test using nitrogen and argon	Verifying test of optimal disinfection condition using nitrogen				
			Wooden block	Silk fabric	Cotton fabric	Korean paper book	Breeding box
Cigarette beetle	Egg	○	○	-	○	○	-
	Larva	-	○	-	○	○	-
	Pupa	○	○	-	-	-	-
	Adult	-	○	-	○	○	-
Drugstore beetle	Larva	-	○	-	○	○	-
	Adult	-	○	-	○	○	-
Varied carpet beetle	Larva	Protein	-	○	-	-	-
Hide Beetle	Larva	Protein	-	-	-	-	○
	Adult	-	-	-	-	-	○
Rice weevil	Adult	-	-	-	-	-	○

○ : testing, - : no testing

살충법에서의 최적 살충조건을 얻었다.

2.2.3. 저산소 농도 살충처리 준비

질소와 아르곤 가스의 살충률 비교를 통한 최적 살충률 선정을 위해 자료의 표면에 서식하는 해충이 아닌 자료의 내부에 서식하는 해충의 살충을 가정하여 준비를 하였다. 10×10×5cm 소나무 재질의 나무 블록에 2×2×1cm 홈을 파고 권연벌레 알, 애벌레, 성충을 30마리씩 넣고 10×10×5cm 나무 블록을 덮고 나사로 조인 후 살충 효과를 평가하는데 사용하였다. 이때 애벌레는 먹이로써 통밀가루와 함께 나무 블록에 넣었으며, 알은 샤아레에 양면 테이프를 붙이고 알을 테이프에 붙인 후 나무 블록에 넣어 살충처리에 사용하였다(Table 1).

2.3. 최적 살충 조건 살충률 검증 시험

2.3.1. 시험 대상 해충

살충률 실험 결과에 따라 선정된 최적 살충 조건에 대한 살충률 검증을 위해 아래와 같이 다양한 대표적인 박물관 해충을 선정하여 살충률을 평가하였다. 식물성 재질 가해 해충으로 권연벌레(*Lasioderma serricorne* (Fabricius)) 알, 애벌레, 번데기, 성충, 인삼벌레(*Stegobium paniceum* (Linnaeus)) 애벌레, 성충을, 동물성 재질 가해 해충으로 애알락수시렁이(*Anthrenus verbasci* (Linnaeus)) 애벌레, 암검은수시렁이(*Dermestes maculatus* DeGeer) 애벌레,

성충을, 그 외 혼충 공시충으로 사용되는 쌀바구미(*Sitophilus oryzae* (Linnaeus)) 성충을 시험 대상 채충으로 선정하였다(Table 1).

2.3.2. 살충 조건

살충률 실험 결과에 따라 선정된 최적 살충 조건의 검증을 위해, 5종의 해충에 대해 질소 가스를 사용하여 산소 농도 0.01%, 온도 25℃, 습도 50%에서 21일간 살충처리를 하였다.

2.3.3. 저산소 농도 살충처리 준비

선정된 최적 살충 조건에서의 다양한 박물관 해충의 살충률 검증을 위한 준비는 다음과 같다. 식물성 재질 가해 해충인 권연벌레 알 30마리, 애벌레와 성충 각 50마리, 번데기 15마리 및 인삼벌레 애벌레와 성충 각 30마리씩을 나무 블록, 광목, 한지 서적 내에 넣고 살충처리에 투입하였으며, 번데기는 나무 블록에만 넣었다. 최적 살충 조건 선정 시험과 같은 방법으로 나무 블록에 권연벌레와 인삼벌레를 넣었다. 광목(밀도 경사 70개/5cm, 위사 72개/5cm, 후도 0.68mm)에는 40cm×50cm를 자른 10매의 광목 위에 15cm×15cm 홈을 판 광목 10매를 놓고 홈에 권연벌레와 인삼벌레를 넣고 20매의 광목으로 덮은 후 해충들이 빠져 나오지 못하도록 문진을 사용하여 고정하여 살충처리에 사용하였다. 한지 서적(크기 25.1cm×31.9cm, 중량 503g, 한지 평량 79.3g/m²)에는 서적 내에 15cm×15cm 홈을 파

서 권연벌레와 인삼벌레는 넣고 덮은 후 한서 서적 8~9권(4Kg~4.5Kg)을 올려놓고 고정하여 살충처리에 사용하였다. 동물성 가해 해충인 애알락수시렁이 애벌레는 견직물과 나무 블록, 암검은수시렁이 애벌레와 성충은 사육함에 넣은 상태로 살충처리에 투입하였다. 애알락수시렁이는 40cm×50cm로 자른 10매의 정련 견직물(밀도 경사 200/5cm, 위사 173개/5cm, 후도 0.16mm) 위에 15cm×15cm 홈을 판 견직물 10매를 얹고 홈에 애벌레 30마리를 얹게 저민 가다랑어포와 함께 넣고 20매의 견직물로 덮은 후 해충들이 빠져나오지 못하도록 문진을 사용하여 고정하여 살충처리에 사용하였으며, 나무 블록에는 가다랑어포와 함께 애벌레 30마리를 넣었다. 암검은수시렁이는 가다랑어포를 넣은 사육함에서 사육 중인 애벌레 6마리, 성충 26마리를 사육함 상태로, 쌀바구미는 쌀을 넣은 사육함에서 사육 중인 성충 356마리를 사육함 상태로 살충처리에 사용하였다(Table 1).

2.4. 살충처리

대용량 저산소 농도 살충 챔버 내부의 높이 70cm~1m 위치의 선반에 살충 대상 해충을 넣고 밀폐한 후 해당 살충 조건에서 살충처리를 하였다(Figure 2). 살충처리는 아르곤의 경우 액화 아르곤 실린더, 질소는 질소발생기를 통해 공급하였으며, 대기 중 산소 농도(20.9%)에서 0.01%까지 도달할 때까지의 준비단계(standby)를 거친 후, 설정한 살충 시간동안 살충처리를 하였다.

Figure 2. Verifying test of optimal disinfection condition.

2.5. 살충률 평가

살충 실험이 완료된 해충들 중 권연벌레와 인삼벌레, 애알락수시렁이, 암검은수시렁이, 쌀바구미는 사육 조건인 온도 28~30℃, 습도 70~75%에서 보관하면서, 성충과 애벌레는 1주일간 1일 간격으로 루페로 해충의 움직임을 관찰하여 1주일째 살충률을 계산하였다. 권연벌레 알은 현미경(Leica DM2500M)으로 1주일간은 1일 간격으로, 그리고 1개월째 알의 부화 여부를 관찰하여 살충률을 계산하였다. 그리고 권연벌레 번데기는 루페로 1주일간은 1일 간격으로, 그리고 1개월째 번데기의 우화(羽化) 여부를 관찰하여 살충률을 계산하였다.

2.6. 저산소 농도 살충 챔버 시스템 운용성 평가

대용량 저산소 농도 살충 챔버 시스템을 이용하여 아르곤과 질소 가스 저산소 농도 살충 처리에 따른 살충률을 비교 평가하였다. 그리고 가스의 차이에 따른 준비단계 소요 시간을 포함하여 운전 중 발생하는 문제점 비교를 통해 시스템의 운용 효율성을 평가하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 질소 및 아르곤 저산소 농도 살충처리 비교

3.1.1. 질소 저산소 농도 살충처리 살충률

질소를 사용하여 챔버 내 산소 농도 0.01%, 습도 50%의 환경하에서 온도를 20℃, 25℃, 30℃로 변화시켰을 때, 나무 블록 속에 넣어 저산소 환경에 간접적으로 노출시킨 권연벌레 성충, 애벌레, 알의 살충률은 Figure 3-5와 같으며, 살충 처리 중 챔버 내 산소 농도, 온도, 습도의 변화는 Figure 6과 같다. 권연벌레 성충, 애벌레, 알은 온도가 높을수록, 살충 시간이 길어질수록 살충률은 높았으며, 알이나 애벌레보다 성충의 살충시간이 짧았다. 권연벌레 성충, 애벌레, 알을 100% 살충하는데 20℃에서는 15일(Figure 3), 25℃에서는 10일(Figure 4), 30℃에서는 7일(Figure 5)이 소요되었다. 이러한 결과로부터 성충은 애벌레나 알보다 살충시간이 짧기 때문에 성충만의 살충실험 데이터로 자료를 살충처리하였을 때, 눈에 보이는 성충은 완전히 살충되지만 눈에 보이지 않는 자료 내에 서식하는 애벌레나 알까지의 살충이 힘들어, 살충처리 후에 다시 출해가 일어날 수 있음을 보여준다.

해충이 저산소 농도 환경에 노출시간이 증가함에 따라 살충률이 증가하는 것은, 해충의 기문(spiracle)을 통해 들어오는 산소가 부족하게 됨에 따라 계속 기문을 열어놓기 때문에 체내의 수분이 급격히 증발하기 때문이다. 또한 온도가 높아지면 해충은 호흡작용을 통해 체내 수분을 증발시켜 체온을 유지하게 되는데, 저온에 비해 고온에서 살충률이 높은 것은 이러한 작용으로 체내 수분 증발이 촉진되기 때문이다(Selwitz *et al.*, 1998).

3.1.2. 아르곤 저산소 농도 살충처리 살충률

아르곤을 사용하여 산소 농도 0.01%, 습도 50%의 환경 하에서 온도를 20℃, 25℃, 30℃로 변화시키는 살충 조건

Figure 3. Percent mortality of adults, larvae and eggs of cigarette beetles in pine wooden blocks exposed to nitrogen at oxygen concentration 0.01%, 20℃ and 50% RH.

Figure 4. Percent mortality of adults, larvae and eggs of cigarette beetles in pine wooden blocks exposed to nitrogen at oxygen concentration 0.01%, 25℃ and 50% RH.

에서, 나무 블록 속에 넣어 저산소 환경에 간접적으로 노출시킨 권연벌레 성충, 애벌레, 알의 살충률은 Figure 7-9와 같다. 질소 저산소 농도 살충처리와 마찬가지로, 권연벌레 성충, 애벌레, 알은 온도가 높을수록, 살충 시간이 길어질수록 살충률은 높았으며, 알이나 애벌레는 성충보다 더 긴 살충시간이 소요되었다. 권연벌레 성충, 애벌레, 알을 100% 살충하는데 20℃에서는 10일(Figure 7), 25℃에서는 7일(Figure 8), 30℃에서는 5일(Figure 9)이 소요되는 것으로 나타났다.

아르곤 저산소 살충처리에서의 100% 살충 소요 시간은 질소에 비해 약 50% 단축되었으며(Figure 10), 이러한 결과는 Valentin의 선행 연구 결과와 일치한다. 아르곤의 저

Figure 5. Percent mortality of adults, larvae and eggs of cigarette beetles in pine wooden blocks exposed to nitrogen at oxygen concentration 0.01%, 30℃ and 50% RH.

Figure 6. Changes of temperature, relative humidity and oxygen concentration for anoxic treatment using nitrogen generator at oxygen concentration 0.01%, 25℃, 50% RH, exposure time 10 days.

산소 농도 살충 원리는 질소와 동일하지만, 질소에 비해 아르곤의 살충속도가 더 빠른 것은 질소보다 아르곤이 분자량, 밀도, 물에 대한 용해도가 더 커서 해충 체내로의 가스 치환에 의한 수분 손실이 촉진되어 해충의 중량 감소가 더 크기 때문이다(Valentin, 1993).

3.2. 저산소 농도 살충 챔버 시스템 운용성 평가

질소와 아르곤 저산소 농도 살충처리를 비교하였을 때, 아르곤이 질소보다 40-50% 살충시간을 단축시킬 수 있어, 아르곤 저산소 농도 살충법은 긴 살충시간을 줄일 수 있는 것이 최대의 장점으로 꼽을 수 있다. 그러나 아르곤의 가격이 질소보다 더 비싸며(순도 99.9% 기준 질소 대비 아르곤

2-3배 고가), 대량의 자료나 대규모 자료를 살충할 경우 아르곤의 공급을 위해 아르곤 가스 실린더보다는 대용량의 액화 아르곤 실린더를 사용하여 매일 공급해야하는 번거로움이 있다. 특히 살충 준비 단계에서 저산소 농도(0.01%)에 도달하기 위해 장시간(28m³ 대용량 저산소 농도 살충 챔버 시스템의 경우, 중압 액화 아르곤 용기로 100 L/분 아르곤 공급시 약 38시간 소요, 액화 아르곤 실린더 4개 분량) 계속 아르곤을 공급해야 하기 때문에, 야간에 가스 부족현상과 같은 원할한 가스 공급에 문제가 일어날 우려가 있다. 이와 같은 빈번한 액화 아르곤 실린더의 공급이라는 번거로움을 피하기 위해서는, 대량의 아르곤의 저장이 가능한 초저온 벌크 탱크를 설치해야 한다. 아르곤 저산소 살충법은 이러한 단점 때문에 현재 Metropolitan Museum

Figure 7. Percent mortality of adults, larvae and eggs of cigarette beetles in pine wooden blocks exposed to argon at oxygen concentration 0.01%, 20°C and 50% RH.

Figure 9. Percent mortality of adults, larvae and eggs of cigarette beetles in pine wooden blocks exposed to argon at oxygen concentration 0.01%, 30°C and 50% RH.

Figure 8. Percent mortality of adults, larvae and eggs of cigarette beetles in pine wooden blocks exposed to argon at oxygen concentration 0.01%, 25°C and 50% RH.

Figure 10. Comparison of minimum exposure time of nitrogen and argon for disinfection of cigarette beetles in pine wooden blocks.

of Art(산소 농도 0.05%, 온도 20℃, 습도 50%, 4주간 살충처리)(The National Folk Museum of Korea, 2011)를 비롯하여 몇몇 박물관에서 산소 불투과 필름으로 만든 백(bag)과 압축 아르곤 가스 실린더를 이용하여 소규모 자료의 살충에 이용되고 있다(Figure 13).

질소는 아르곤보다 살충시간이 긴 단점이 있지만, 대량의 질소를 액화 질소 실린더 대신 질소발생기를 이용하여 자동으로 공급이 가능하여 실린더 교체와 같은 번거로움이 없다. 그리고 액화 질소 실린더나 액화 아르곤 실린더에 비해 고순도(99.99%) 질소의 대량 공급을 통해 살충 준비 시간을 줄일 수 있다(Figure 11). 대용량 저산소 농도 살충 챔버 시스템에서 질소발생기를 통해 semi-dynamic mode로 질소 공급하면서, 살충처리 과정에서의 산소 농도, 온도, 습도의 변화는 Figure 6과 같으며, 준비단계를 거쳐 저산소 농도에서 온습도가 일정하게 유지되면서 살충을 전

Figure 11. Comparison of standby time between liquid nitrogen and nitrogen generator in large scale anoxic chamber.

Figure 12. Anoxic tent system.

자동으로 운용이 가능하였다. 또 외부로부터 산소 유입이 쉬운 대형 텐트(내용적 30m³)에서도 질소발생기로부터 질소를 공급하여 산소 농도를 0.05%까지 떨어뜨리는 것이 가능하며 semi-dynamic mode로 질소를 공급하면서 전자동으로 살충처리를 할 수 있다(Figure 12). 따라서 원활한 문화재 살충처리 시스템으로 질소 환경 저산소 농도 살충 챔버 시스템을 운영하는 것이 가장 무난할 것으로 판단된다.

3.3. 최적 살충 조건 선정

대용량 저산소 농도 살충 챔버 시스템을 이용한 저산소 농도 살충처리의 원활한 운용이 가능한 질소 가스를 사용하여, 권연벌레 알, 애벌레, 성충에 대한 다양한 살충 조건에서의 살충률 실험결과로부터 최적 살충 조건을 선정하였다. 질소 가스 환경에서 20℃ 15일, 25℃ 10일, 30℃ 7일의 살충 시간이 소요되지만, 한국의 박물관에서 가끔씩 발견되는 범하늘소까지 완전 살충을 위해서는 권연벌레 살충 소요시간의 2배의 시간이 필요하다(Valentin, 1993). 그리고 살충 소요시간의 단축을 위해서는 온도를 올려야 하지만, 국립민속박물관 소장품 관리를 위한 온도 기준 20±4℃을 고려하였을 때, 산소 농도 0.01%, 온도 25℃, 습도 50%에서 21일 살충처리를 최적 살충 조건으로 선정하였다. 이 조건은 범하늘소와 같은 하늘소류(old house borer)의 100% 살충을 위한 Valentin(산소 농도 0.03%, 습도 50%, 온도 20℃에서 살충 시간 20일, 30℃에서 10일)(Valentin, 1993)이나 Gunn(산소 농도 0.1%, 온도 25℃, 습도 50%, 살충 시간 7일)(Gunn, 2007)의 실험 조건을 충분히 만족하였다. 그리고 질소 저산소 농도 살충처리를 위해 챔버를 운용중인 해외 박물관의 운용 조건과 비교해 살충 시간은 유사하거나 다소 길게 나타났다(Table 2).

Figure 13. Anoxic treatment using argon in Metropolitan Museum of Art(Photo by Tsukada Masahiko).

Table 2. Specifications and conditions of anoxic systems using nitrogen in worldwide museums etc.

Item	USA J.Paul Getty Museum	Japan Kyushu National Museum	France Quai Branly Museum	Hong Kong Conservation Office, Leisure and Cultural Services Department		
Type	Bubble	Chamber	Chamber	Chamber		
Volume	8m ³	7m ³	35m ³ ×2, 25m ³ ×1	7.07m ³		
Gas supply	Liquid nitrogen cylinder	Nitrogen generator	Nitrogen generator	Compressed gas cylinder		
Control of gas supply	Dynamic mode	Dynamic mode	Dynamic mode	Semi-dynamic mode		
Standby time	-	24 hours	1 ~ 2days	8 hours		
Condition of disinfection	Oxygen concentration	0.1% below	0.03%	0.1% below	0.2%	
	Temperature	23℃ or above	25 ~ 30℃	20℃	25℃	19-21℃
	Relative humidity	50%	55 ~ 60%	50%	50%	60%
	Exposure time	2 weeks	3 weeks	3 weeks	2 weeks	3 weeks
Reference	The National Folk Museum of Korea, 2012		Gunn, 2007			

Table 3. Percent mortality of various museum insects exposed to nitrogen at oxygen concentration 0.01%, 25℃, 50% RH and exposure time 21 days.

Museum Insects	Wooden block	Silk fabric	Cotton fabric	Korean paper book	Breeding box
Cigarette beetle	Egg	100 no hatching	-	100 no hatching	-
	Larva	100	-	100	-
	Pupa	100	-	-	-
	Adult	100	-	100	-
Drugstore beetle	Larva	100	-	100	-
	Adult	100	-	100	-
Varied carpet beetle	Larva	100	100	-	-
Hide beetle	Larva	-	-	-	100
	Adult	-	-	-	100
Rice weevil	Adult	-	-	-	100

- : no testing

3.4. 최적 살충 조건 살충률 검증

대용량 저산소 농도 살충 챔버 시스템을 이용하여 권연 벌레의 살충률로 부터 선정된 최적 살충 조건(산소 농도 0.01%, 온도 25℃, 습도 50%, 살충시간 21일)에서 살충률을 검증하였다. 나무 블록, 면직물, 한지 서적에 넣은 권연 벌레 성충, 번데기, 애벌레 및 알, 나무 블록, 면직물, 한지 서적에 넣은 인삼벌레 성충 및 애벌레, 나무 블록, 견직물에 넣은 애알락수시령이 애벌레, 사육함의 암검은수시령

이 애벌레 및 성충, 사육함의 쌀바구미 성충을 살충처리한 결과, 5종의 해충모두 100% 살충이 되었다(Table 3, Figure 14, Figure 15). 살충처리 과정에서 암검은수시령이 애벌레 5마리 중 4마리는 번데기로 변태 후 살충된 상태로 발견되었다(Figure 15). 이와 같은 살충 데이터로부터, 살충 실험결과에 기초해 선정된 최적 살충 조건은 목가구, 목제생활도구, 복식류, 서적과 같은 자료 내에 서식하는 동식물질 가해 문화재 해충의 유효한 살충조건임이 검증되었다.

Figure 14. Disinfected status after anoxic treatment, Cigarette beetle in wooden block: 1. adults, 2. pupae, 3. larvae, 4. eggs, Drugstore beetle in wooden block: 5. adults, 6. larvae, Varied carpet beetle in wooden block: 7. larvae.

Figure 15. Disinfected status after anoxic treatment. Cigarette beetle in cotton fabric: 1. adults, larvae, eggs, Cigarette beetle in Korean paper book: 2. adults, larvae, eggs, Drugstore beetle in cotton fabric: 3. adults, larvae, Drugstore beetle in Korean paper book: 4. adults, larvae, Varied carpet beetle in silk fabric: 5. larvae, Hide beetle in breeding box: 6. adults, 7 larva and pupae(metamorphosis of 4 larvae into pupae during anoxic treatment), Rice weevil in breeding box: 8. adults.

4. 결 론

메틸브로마이드 대체 살충법으로써, 대용량 저산소 농도 살충 챔버 시스템을 이용하여 한국의 박물관에서 발생 빈도가 높은 문화재 해충 중 살충 내성이 강한 권연벌레에 대해, 질소와 아르곤 저산소 농도 살충처리에 따른 살충력 비교 및 저산소 농도 살충 챔버 시스템의 운용성의 평가를 통해 최적 살충 운전 조건을 선정하였다. 그리고 선정된 최적 살충 조건에서 여러 종의 문화재 해충에 대한 살충력을 검증하였다.

1. 질소 저산소 농도 살충처리를 하였을 때 산소 농도 0.01%, 습도 50%의 환경하에서 나무 블록 속의 권연벌레 성충, 애벌레, 알의 완전 살충을 위해 20℃ 15일, 25℃ 10일, 30℃ 7일이 소요되었다. 아르곤에서는 20℃ 10일, 25℃ 7일, 30℃ 5일이 소요되어, 질소 저산소 농도 살충처리하는 아르곤에 비해 살충시간이 40-50% 더 소요되었다.

2. 대용량 저산소 농도 살충 챔버 시스템의 운용성을 평가한 결과, 대량의 자료나 대형 자료의 살충에는 아르곤은 살충 시간이 짧지만, 가스 비용 및 잦은 가스 실린더 교체의 문제로 운용에 한계가 있다. 이에 반해 질소 저산소 농도 살충법은 질소발생기로 대량의 질소를 자동 공급할 수 있어 원활한 운용이 가능하였다.

3. 대용량 저산소 농도 살충 챔버 시스템을 이용하여 국내의 박물관에서 발견되는 문화재 해충의 살충을 위한 최적 조건은, 박물관의 온도 기준과 범하늘소의 완전 살충까지 고려하여 산소 농도 0.01%, 온도 25℃, 습도 50%, 살충 시간 21일로 선정하였다.

4. 최적 살충 조건에서 나무 블록, 면직물, 한지 서적에 넣은 권연벌레 알, 애벌레, 번데기, 성충, 나무블록, 면직물, 한지 서적에 넣은 인삼벌레 성충, 애벌레, 나무 블록, 견직물에 넣은 애알락수시렁이 애벌레, 사육함의 암검은수시렁이 애벌레, 성충, 사육함의 쌀바구미 성충은 100% 살충이 되었다.

이상의 연구 결과로부터, 대용량 저산소 농도 살충 챔버 시스템을 사용하여 질소 저산소 농도 살충법으로 박물관에서 발생하는 문화재 해충의 완전 살충과 원활한 운용이 가능하였다.

REFERENCES

Chung, Y.J., Kim, Y.J. and Kang D.I., 2012, Application of

low oxygen treatment for wooden building, The 35th National Conference of the Korean Society of Conservation Science of Cultural Heritage, 1-2. (in Korean)

Examples of Carbon Dioxide Treatments for Eradication of Insect Pests in Folkloric Cultural Objects, Bunkazai Hozon Shufuku Gakkaishi, 46, 76-95. (in Japanese with English abstract)

Goldberg, L., 1996, A History of Pest Control Measures in the Anthropology Collections of the National Museum of Natural History, Smithsonian Institute, Journal of the American Institute of Conservation, 35, 23-45.

Gunn, M., 2007, Anoxia - Treatment by Oxygen Deprivation of Museum Objects, International Preservation News, 42, 8-13.

Hidaka, S., Date, H., Nochide, H., Kimura, H., Kigawa, R. and Miura, S., 2002, Practical.

Jeong S.H., Lee, M.Y., Kim, D.W. and Chung, Y.J., 2011, Investigation of environment-friendly insecticidal treatment technology and analysis of its effects, The 33rd National Conference of the Korean Society of Conservation Science of Cultural Heritage, 157-158. (in Korean)

Kang, D.I., 2009a, The Stability Appraisalment on Cultural Property Material with the Replacing Fumigation Gas of Methyl Bromide, Journal of Conservation Science, 25, 283-291. (in Korean with English abstract)

Kang, D.I., 2009b, Stability Appraisalment on Cultural Property Material with the Replacing Fumigation Gas of Methyl BromideII, Journal of Conservation Science, 25, 465-471. (in Korean with English abstract)

Kigawa, R., Yamano, K., Miura S. and Maekawa, S., 1999, An Automated Anoxic Treatment Chamber for Cultural Objects A Novel System with Nitrogen Generator, Science for Conservation, 38, 1-8. (in Japanese with English abstract)

Kigawa, R., Miyazawa, Y., Yamano, K., Miura, S., Nochide, H., Kimura, H. and Tomita, B., 2001, Practical Protocols of Low Oxygen Atmosphere and Carbon Dioxide Treatments for Eradication of Japanese Museum Insects, Bunkazai Hozon Shufuku Gakkaishi, 45, 73-86. (in Japanese with English abstract)

Lee, M.Y., Kim, S.H., Kim, D.W. and Chung, Y.J., 2012,

- Biocide effect of low oxygen and temperature treatment, The 35th National Conference of the Korean Society of Conservation Science of Cultural Heritage, 31-32. (in Korean)
- Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer, 1997.
- Nochide H., Kimura H., Miyachi, H., Kigawa, R., Date, H. and Hidaka, S., 2004, Examination of Various Conditions for Carbon Dioxide Treatment to Eradication of Museum Insects, Bunkazai Hozon Shufuku Gakkaishi, 48, 1-15. (in Japanese with English abstract)
- Oh, J.S., 2004, Museum and Pest Control, The Review of Folk Life and Culture, 15, 5-34. (in Korean with English abstract)
- Oh, J.S., 2011, Anoxia Techniques to Eradicate Insects for Conservation of Cultural Properties in Museums, Journal of Conservation Science, 27, 231-24. (in Korean with English abstract)
- Oh, J.S., Choi, J.E. and Lee, J.M., 2012, Trial Manufacture and Disinfection Evaluation of Anoxic Chamber System for Museum Insects, Journal of Conservation Science, 28, 377-385. (in Korean with English abstract)
- Rust, M.K., Kennedy, J.M., 1993, The Feasibility of using Modified Atmospheres to Control Insect Pests in Museums, The Getty Conservation Institute Scientific Program Report, Getty Conservation Institute, Los Angeles.
- Selwitz, C., Maekawa, S., 1998, Anoxia as a Conservation Procedure, Inert Gases in the Control of Museum Insect Pests, Getty Conservation Institute, Los Angeles, 7-15.
- The National Folk Museum of Korea, 2008, Greenish grey-black spotted longicorn, Museum and Pest Management, The National Folk Museum of Korea, Seoul, 190-191. (in Korean)
- The National Folk Museum of Korea, 2011, Business Trip Report. (in Korean)
- The National Folk Museum of Korea, 2012, Business Trip Report. (in Korean)
- Valentin, N., 1993, Comparative Analysis of Insect Control by Nitrogen, Argon and Carbon Dioxide in Museum, Archives and Herbarium Collections, International Biodeterioration & Biodegradation, 32, 263-278.
- Valentin, N., 2002, Non-toxic methods and systems to control biodeterioration in historic objects of large size, 5th European Commission Conference, Cultural Heritage Research, 52-56.
-